NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. E. CASPARI,

INGÉNIEUR HYDROGRAPHE DE LA MARINE,
RÉPÉTITEUR DE MÉCANIQUE A L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES
DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ECOLE POLYTECHNIQUE,
Quai des Grands-Augustins, 55.

1892

NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. E. CASPARI,

Ingénieur hydrographe de la Marine,
Répétiteur de Mécanique à l'École Polytechnique.

1860. Élève de l'École Polytechnique.
1862. Élève Ingénieur hydrographe.
1863-67. Campagnes hydrographiques sur les côtes de France et d'Espagne.
1867-69. Campagne hydrographique à la Guadeloupe.
1869-76. Chargé du Service des instruments au Dépôt de la Marine.
1874-75. Campagnes hydrographiques sur les côtes de France.
1877-79. Campagne hydrographique en Cochinchine et au Tonkin.
1879-86. Rapporteur des Commissions nautiques du littoral.
1881-90. Chef de la Section des mers des Indes et de la Chine.
1881-83. Chargé d'un cours d'Astronomie au Dépôt de la Marine.
1882-92. Conférences sur la Régulation des compas aux Officiers de Marine détachés à l'Observatoire de Montsouris.
1884. Secrétaire et Rapporteur de la Commission pour l'unification des longitudes et des heures.
1889. Répétiteur de Mécanique à l'École Polytechnique.
1889. Secrétaire du Comité d'organisation du Congrès international de Chronométrie et Secrétaire du Congrès.
1891. Chef de la Section de l'Hydrographie générale au Service hydrographique de la Marine.
1892. Vice-Président de la Commission centrale de la Société de Géographie.

Les Travaux scientifiques de M. Caspari comprennent :

Des recherches mathématiques, ayant principalement pour objet la Chronométrie et l'étude des boussoles marines, et vérifiées par des expériences;

Des levés hydrographiques et géographiques sur les côtes de France, à la Guadeloupe, en Indo-Chine et aux environs d'Obock (7 ans de navigation);

L'Astronomie pratique : observations astronomiques variées pour la détermination des positions géographiques et recherches théoriques sur divers points de cette branche de la Science;

La Météorologie nautique et la Physique du Globe;

La discussion et la mise en œuvre de documents hydrographiques et géographiques, la rédaction et la publication de Cartes;

Des études sur les ports de mer.

L'Académie des Sciences lui a décerné deux prix :

En 1877, le Prix de Mécanique, de la fondation de Monthyon, pour ses travaux sur les chronomètres;

En 1889, une partie du Prix extraordinaire, pour son livre intitulé : *Cours d'Astronomie pratique*.

I.

CHRONOMÉTRIE.

1. Études sur le mécanisme et la marche des chronomètres (*Recherches chronométriques*, XI[e] cahier, 1 vol. in-8° de 150 pages. Imprimerie nationale; 1876).

   Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences.

2. Etude de l'influence de l'inertie du spiral sur l'isochronisme (*Comptes rendus*, 1875, t. LXXXI, p. 1122).
3. Études sur le balancier compensateur de M. Winnerl (*Comptes rendus*, 1876, t. LXXXII, p. 894).
4. Isochronisme du spiral cylindrique sans courbes terminales (*Comptes rendus*, t. LXXXIII, p. 47).
5. Influence de l'inclinaison sur la marche des Chronomètres (*Recherches chronométriques*, XIV[e] cahier, p. 22; 1887).
6. Rapport sur les perturbations et sur le réglage des chronomètres avec une Note complémentaire sur l'isochronisme (*Comptes rendus du Congrès international de Chronométrie*, tenu à Paris en 1889. Gauthier-Villars et fils).
7. Astronomie pratique (pour mémoire, *voir* plus loin).

Ces Travaux se rapportent à deux ordres d'idées très distincts.

Chargé pendant six ans du Service des chronomètres, l'auteur s'est trouvé en relations, d'une part avec les horlogers, d'autre part avec les officiers de marine.

Il a donc dû d'abord se préoccuper des défectuosités du mécanisme de ces instruments, des causes de perturbation qui faussent leurs indications et des moyens d'y remédier par la construction; il a cherché ensuite à dégager les méthodes les plus propres à utiliser

rationnellement des instruments imparfaits, et surtout à vulgariser dans la marine l'emploi des formules de correction, en distinguant soigneusement les erreurs systématiques, qui peuvent être prévues et calculées, de celles qui se produisent fortuitement, et sans suivre en apparence une loi bien définie.

A.

THÉORIE MÉCANIQUE DES CHRONOMÈTRES.

Isochronisme et compensation des températures : tels sont les deux points capitaux à envisager dans l'Horlogerie de précision, et qui ont été magistralement traités, le premier par Phillips, le second par Yvon Villarceau. Il importe de citer aussi les beaux travaux de M. Resal sur les applications de la Mécanique à l'Horlogerie. Mais, en dehors de ces travaux analytiques vérifiés par l'expérience, plusieurs points restaient obscurs et avaient besoin d'être étudiés à nouveau.

Perturbations de l'isochronisme. — Les horlogers avaient remarqué que les spiraux construits d'après les données de Phillips, et qui réalisent d'une façon parfaite la condition statique d'isochronisme, donnaient parfois de l'avance aux petites amplitudes, aux petits arcs, comme l'on dit en horlogerie. Phillips lui-même avait déjà mis en évidence une des causes qui contribuent à ce résultat, et qui réside dans les déformations produites par le mouvement, dans les lames élastiques du balancier circulaire. L'auteur arrive, par une voie différente, au même résultat.

Le type ordinaire de balancier compensateur se compose de deux lames bimétalliques cylindriques, acier en dedans, laiton en dehors, de telle sorte que l'élévation de température fait croître la courbure moyenne. Pour être sensibles, ces lames doivent être minces; elles portent des masses métalliques assez pesantes pour leur donner le moment d'inertie requis. La rotation du balancier donne lieu à des réactions d'inertie qui déforment ces lames périodiquement. On démontre *a priori* que la force d'inertie tangentielle, tout en contribuant à la déformation, n'a pas d'influence sur le moment d'inertie moyen, ni, par suite, sur la durée de l'oscillation. Mais la force centrifuge produit

un écartement des masses et un accroissement du moment d'inertie, accroissement d'autant plus grand que l'amplitude est plus grande, le spiral étant supposé isochrone.

Dans l'équation du mouvement pendulaire, le moment d'inertie du balancier devient alors variable et renferme un terme proportionnel au carré de la vitesse angulaire; l'équation ne peut s'intégrer que par approximation, en développant en une série très rapidement convergente, grâce à la petitesse des déformations. La durée de l'oscillation croît alors avec l'amplitude. Le coefficient dont dépend la déformation peut s'évaluer théoriquement, comme l'a fait Phillips; on peut aussi le déterminer par l'expérience en mesurant les déplacements des lames bimétalliques sous l'influence d'un poids additionnel, comme nous l'avons fait. Avec le balancier circulaire ordinaire, la perturbation de l'isochronisme atteint plusieurs secondes aux amplitudes usuelles; pour obtenir l'isochronisme pratique, c'est donc le balancier qu'il faut modifier.

Effet de l'inertie du spiral. — La théorie de Phillips négligeait la masse du spiral, très faible en regard de celle du balancier; l'auteur s'est proposé de calculer l'erreur ainsi commise. Considérant le spiral, muni des courbes de Phillips, comme conservant, après comme avant déformation, la figure circulaire des spires, il introduit dans l'équation du mouvement du système les forces d'inertie de ce ressort; elle prend alors une forme plus compliquée, mais un changement de variables permet de faire dépendre son intégration de celle d'une équation linéaire du premier ordre, puis, en tenant compte du degré de petitesse des quantités relatives au spiral, de trouver la durée de l'oscillation qui contient d'abord un terme constant, fonction de la masse et des dimensions du spiral, notamment de son rayon, puis un terme proportionnel au carré de l'amplitude. La conclusion est que la durée des oscillations est d'autant plus longue que le moment d'inertie du spiral est plus grand et que par suite les grandes oscillations sont plus longues que les petites.

Les deux conclusions ont été vérifiées par l'expérience au moyen des chronomètres construits à cet effet par M. Winnerl et M. Leroy; on en déduit la règle pratique que l'isochronisme est d'autant plus approché

que le rayon et la masse du spiral sont moindres, ce qui explique la difficulté de régler les spiraux en or que d'autres considérations tendraient à faire préférer, et l'utilité de réduire le rayon.

Isochronisme du spiral cylindrique sans courbes terminales. — Phillips a démontré rigoureusement que le spiral muni des courbes théoriques qu'il a indiquées est le seul qui satisfasse à la condition analytique d'isochronisme, savoir que le moment de l'action qu'il exerce sur le balancier est proportionnel à l'angle dont celui-ci est écarté de sa position d'équilibre. Il a montré également que la forme circulaire des courbes, autrement dit la forme d'une hélice cylindrique sans courbes terminales, ne satisfait pas à cette condition. C'est, du reste, ce que vérifie l'expérience faite avec la balance élastique. D'autre part, de nombreux horlogers affirmaient qu'on peut obtenir l'isochronisme avec un spiral de ce type; ils se fondaient pour cela sur le célèbre théorème découvert expérimentalement par Pierre Leroy, le fondateur de la Chronométrie de précision, à savoir que, « dans tout ressort d'une étendue suffisante, » il y a une certaine longueur où toutes les vibrations, grandes et » petites, sont isochrones ».

Il y avait là une apparence de contradiction entre la théorie et l'expérience, et il était nécessaire d'en découvrir la cause, tant dans l'intérêt de la Science que dans celui des horlogers, que cette difficulté aurait pu rendre défiants à l'égard de la théorie de Phillips, à laquelle pourtant l'horlogerie a dû ses progrès les plus considérables et les mieux constatés. La théorie de la résistance des matériaux, qui, comme M. Resal l'a fait voir, donne les mêmes résultats que la théorie mathématique de l'élasticité dans le cas des flexions circulaires, nous a permis de résoudre complètement la question, en démontrant et généralisant le théorème de Pierre Leroy, et montrant que dans des circonstances bien déterminées on peut réaliser un mouvement vibratoire isochrone sans que le moment de l'action éprouvée par le balancier soit proportionnel à l'angle d'écart. Voici sommairement la marche suivie.

L'équation d'équilibre du balancier dans le cas général donne le moment moteur sous forme d'une somme de deux termes, le premier proportionnel à l'angle dont le balancier est écarté de sa position

d'équilibre, le second contenant les pressions latérales de l'axe et les coordonnées du centre de gravité du spiral. Ce dernier disparaît par l'emploi des spiraux Phillips, mais non autrement. Dans le cas du spiral exactement cylindrique, on peut exprimer les coordonnées d'un point du spiral déformé et la longueur de l'arc au moyen de trois intégrales qui ne sont généralement pas calculables, mais qu'on peut évaluer avec une approximation suffisante en supposant que les pressions latérales sont faibles et que le centre de gravité du spiral s'écarte peu de l'axe du balancier. On arrive alors à avoir pour équation du mouvement du balancier une équation différentielle du deuxième ordre, dans laquelle le coefficient de l'amplitude est une constante augmentée d'une fonction périodique de l'amplitude α et de l'angle $p = 2n\pi + q$ du spiral. Cette fonction ayant des valeurs très petites, l'équation s'intègre par les séries, ou mieux par la méthode de la variation des constantes arbitraires, et la durée de l'oscillation s'exprime au moyen de fonctions de la famille des fonctions de Bessel, qui peuvent se développer en séries convergentes suivant les puissances paires de l'amplitude. La perturbation est constante et indépendante de l'amplitude quand le spiral a un nombre entier de tours $\pm \frac{\pi}{2}$, ce qui donne dans chaque spire deux points d'isochronisme.

Mais la substitution de cette valeur dans l'équation différentielle ne rend pas constant le coefficient de l'amplitude : donc ici l'isochronisme a lieu sans que le couple moteur soit proportionnel à l'angle d'écart.

La solution est pratiquement suffisante pour les balanciers légers et peu déformables avec spiraux de faible rayon. En introduisant dans l'expression de la perturbation ci-dessus l'effet de l'élasticité du balancier et de l'inertie du spiral, représentés par un terme proportionnel au carré de l'amplitude, on voit qu'on ne peut plus rendre la durée rigoureusement indépendante de l'amplitude, mais qu'on peut trouver une valeur de p telle que cette durée ait la même valeur aux amplitudes extrêmes qu'on veut expérimenter, et qu'alors elle varie peu pour les amplitudes intermédiaires.

En continuant la discussion du problème et ayant égard aux valeurs des fonctions, on arrive à montrer que toutes les limites d'amplitudes

ne sont pas favorables pour expérimenter l'isochronisme, et que les meilleures amplitudes pour ces expériences sont celles de 460° et 315°. Ce fait, ignoré des horlogers, et que la théorie seule a fait découvrir, explique certains insuccès qui avaient été signalés et indique en même temps le moyen d'y remédier.

L'ensemble de ces résultats a été soumis à des vérifications expérimentales qui les confirment de tout point. La position des points d'isochronisme avec le balancier ordinaire est exactement celle qu'une longue expérience a indiquée à M. Berthoud : le déplacement des points d'isochronisme quand le balancier devient plus léger et moins déformable a été vérifié par Vissière.

Influence des résistances. — Les recherches théoriques antérieurement faites s'accordaient à prouver que le frottement ordinaire n'altère pas l'isochronisme supposé obtenu. Elles montraient également qu'on peut faire abstraction de la résistance de l'air dans les cas où celle-ci est proportionnelle soit à la vitesse, soit au carré de la vitesse. Mais le premier résultat ne pouvait s'étendre sans démonstration aux spiraux sans courbes, car ici les pressions latérales ne sont plus constantes. D'ailleurs la formule qui exprime la résistance de l'air en fonction de la vitesse n'est pas bien certaine : ce point appelait également une étude complémentaire.

En introduisant dans l'équation du mouvement le frottement dû à la pression variable et intégrant par la même méthode de variation des constantes, on trouve que les demi-oscillations ascendante et descendante ne sont plus égales, mais que leurs altérations, qui sont fonctions de l'amplitude, se détruisent et que finalement l'isochronisme n'est pas affecté par les frottements latéraux. Ce résultat a été vérifié expérimentalement par M. Berthoud, qui a adapté à un chronomètre deux spiraux égaux et opposés, détruisant les frottements latéraux, et a trouvé les points d'isochronisme par la même règle.

Quant à la résistance de l'air, on peut démontrer que, quelle que soit sa forme, pourvu qu'elle puisse être représentée par un polynôme ne renfermant que les puissances entières de la vitesse, son influence sur l'isochronisme est négligeable. Il suffit pour cela d'écrire au deuxième membre de l'équation une fonction entière de degré quel-

conque de la dérivée de l'amplitude dans laquelle, conformément à l'expérience, les coefficients sont très petits, et d'intégrer toujours par la même méthode; on trouve ainsi que la perturbation des amplitudes a une valeur sensible, mais que celle de la durée des oscillations est nulle, si l'on néglige les carrés et les doubles produits des coefficients.

Ce résultat est conforme aux expériences faites par M. Rozé et à celles de Jürgensen, si l'on tient compte, dans ces dernières, de l'état d'anisochronisme du spiral employé.

Marche des chronomètres inclinés. — On s'efforce de disposer les chronomètres de telle sorte que l'axe du balancier reste toujours vertical. Dès lors la pesanteur est sans influence sur la marche, mais des causes diverses peuvent déranger plus ou moins cette verticalité. Si alors le système régulateur n'est pas parfaitement centré, la marche subit une altération. Phillips a calculé l'effet résultant d'une excentricité du balancier et en a déduit la règle pratique pour corriger ce défaut quand on a observé la marche à diverses inclinaisons. Mais il se présente ce fait curieux que la moyenne des marches obtenues en inclinant le chronomètre successivement sur ses quatre faces, et qui devrait être égale à la marche à plat, en diffère sensiblement.

Nous avons réussi à montrer que cette différence est due à l'élasticité des lames du balancier, et nous en avons donné une évaluation approximative conforme à la moyenne d'un grand nombre d'expériences faites au service hydrographique.

La conclusion pratique, c'est qu'on peut réduire cet effet par l'emploi de balanciers à lames planes.

De même l'excentricité du spiral donne lieu à un effet analogue : nous en avons également donné la théorie, mais sans la développer jusqu'au bout, vu la facilité que les artistes trouvent à corriger empiriquement les variations qui accompagnent l'inclinaison.

Recherches sur le balancier compensateur. — Les résultats qui précèdent, ajoutés à ceux que des savants déjà cités avaient établis antérieurement, ne laissaient aucun doute sur la possibilité d'obtenir l'isochronisme à température constante, non plus que sur la meilleure voie

à suivre pour y arriver. Les seules causes de perturbation restantes résident dans le balancier ordinairement employé qui, d'une part, en se déformant sous l'influence des forces d'inertie développées par la rotation, empêche l'emploi des spiraux les plus parfaits et, d'autre part, ne permet pas de corriger complètement l'influence de la température, et laisse toujours subsister une petite erreur résiduelle.

Lorsque l'on règle un chronomètre ayant un spiral en acier trempé et un balancier circulaire laiton-acier, de telle manière que la marche soit la même à deux températures données, 0° et 30° par exemple, il prend de l'avance aux températures intermédiaires : c'est précisément ce qu'exprime la formule des marches proposée par Lieussou. L'erreur restante est ce que les horlogers appellent l'*erreur secondaire*. On a cherché à la combattre par des compensations additionnelles, mais on complique ainsi les organes, on les rend plus délicats et l'opération du réglage devient très longue.

Winnerl, partant d'essais antérieurs faits par Dent et Hartnup, avait pensé que l'on obtiendrait une compensation parfaite par l'emploi des lames bimétalliques planes, portant à leur extrémité des tiges inclinées à 45° sur lesquelles seraient disposées les masses compensatrices. Il avait essayé l'application de cette idée, mais n'avait réussi qu'à moitié.

L'auteur, mis par l'éminent horloger au courant de ces recherches, entreprit de traiter la question par l'Analyse, en se basant sur la théorie des lames bimétalliques, telle qu'elle avait été formulée par Yvon Villarceau. Étant donnée une lame bimétallique plane à la température moyenne, portant à son extrémité une tige qui fait un certain angle avec sa ligne neutre, tige filetée sur laquelle se meut un écrou d'une certaine masse, il s'agit de déterminer les variations qu'éprouve le moment d'inertie de ce système, quand la température, en variant, fait courber la lame. L'application des formules d'Yvon Villarceau ramène la question à un problème de Géométrie. La variation du moment d'inertie sous l'influence de la température se compose de deux termes principaux, l'un proportionnel à la température, l'autre à son carré, dont les coefficients renferment l'angle d'inclinaison de la vis sur la lame et la distance de la masse mobile à l'origine de la vis; on en déduit que l'on peut obtenir l'égalité de marche diurne pour deux tempé-

ratures données en déplaçant l'écrou sur la vis, puis annuler l'erreur à la température moyenne en faisant varier l'inclinaison de la vis. La discussion géométrique a donné aussi la forme la plus convenable à attribuer aux masses compensatrices pour obtenir le maximum d'effet avec un poids donné. Le chronomètre 511 Winnerl a été réglé en calculant au moyen des marches observées les corrections que devaient recevoir les éléments, et la compensation obtenue a été aussi parfaite qu'on pouvait le désirer : le plus grand écart des marches à des températures variant entre 0° et 30° n'a pas dépassé $0^s,76$; tandis qu'habituellement l'erreur secondaire atteint 2^s et 3^s, surtout quand le spiral est bien isochrone.

La théorie a mis en évidence un autre avantage de ce balancier. En partant des formules de la résistance des matériaux nous avons calculé la déformation élastique qu'il subit sons l'influence du mouvement de rotation; on a trouvé ainsi que la perturbation de l'isochronisme est réduite au quart de ce qu'elle est avec le balancier circulaire.

Ce résultat était d'une grande importance, parce qu'il constitue une propriété générale des lames bimétalliques planes, et qu'il montre la manière de disposer le balancier pour pouvoir, sans sacrifier l'isochronisme pratique, appliquer les formes de spiraux de Phillips. L'expérience montra, conformément à la théorie, que le même spiral, qui avec un balancier circulaire avançait de 2^s aux petits arcs, retardait de $0^s,5$ avec le nouveau balancier.

Cette dernière circonstance est défavorable à la compensation; il est probable qu'avec un spiral qui aurait eu une avance de $0^s,5$ aux petits arcs, la compensation eût encore été plus parfaite; malheureusement la mort de Winnerl a empêché la continuation de ces essais.

Applications du chronomètre à la Physique. — Le chronomètre est un instrument de mesure d'une précision comparable aux plus délicats appareils de Physique. Phillips avait montré comment il peut servir, par exemple, à la détermination des coefficients d'élasticité de divers métaux, en faisant des spiraux avec ces substances et observant les durées d'oscillation d'un même balancier avec ces différents spiraux.

Nous avons fait voir comment le même principe permet de déterminer la variation du coefficient d'élasticité avec la température. Repre-

nant des observations faites à diverses époques par plusieurs observateurs sur des chronomètres non compensés, observations qui n'avaient jamais été discutées à ce point de vue, nous avons pu calculer la constante en question pour l'acier trempé, et le résultat a été que la variation du coefficient d'élasticité pour 1° de température est 20 fois plus forte que le coefficient de dilatation. Ces résultats ont été communiqués à la *Société de Physique* (voir *Bulletin des séances de la Société française de Physique*, 1876; p. 22-26).

B.

RECHERCHES SUR L'EMPLOI DES CHRONOMÈTRES A LA MER.

On a longtemps pensé qu'il fallait prendre son parti des anomalies que présente la marche des chronomètres embarqués, en essayant de les corriger par la multiplicité des instruments et des observations et qu'il ne fallait généralement pas demander aux longitudes chronométriques une précision bien supérieure à celle que peut donner l'observation des distances lunaires.

Pour les chronomètres suivis à terre dans un observatoire, Lieussou avait montré dès 1854 que leurs marches sont une fonction continue du temps et de la température, mais on hésitait à étendre cette conclusion aux montres embarquées. Pourtant les travaux de plusieurs officiers, parmi lesquels nous citerons MM. de Cornulier, Mouchez, de Magnac et Fleuriais, avaient combattu ce préjugé, en montrant que la plupart des variations que l'on jugeait capricieuses obéissaient en réalité à une loi. Mais beaucoup de chercheurs, n'ayant pu expérimenter que sur un nombre restreint de montres et dans des circonstances plus ou moins particulières, avaient été amenés à des généralisations qui n'étaient pas toujours assez motivées et qui se heurtaient à des contradictions nombreuses.

L'auteur entreprit alors le dépouillement méthodique des archives du Service des chronomètres en même temps qu'il essayait une synthèse des nombreux Mémoires publiés sur la question, afin d'en dégager la partie la moins discutable et la mieux établie. Les résultats de ce travail, publiés dans les Ouvrages 1, 6 et 7 ci-dessus, peuvent se résumer comme suit.

Les chronomètres embarqués subissent, comme ceux qui sont observés à terre, l'influence régulière du temps et de la température. Cette influence, variable d'un chronomètre à l'autre, est très sensiblement constante pour une montre donnée; il est possible de la représenter par une formule ou une courbe et d'éliminer par là la majeure partie des erreurs. Les instruments en usage dans la marine française ont généralement leurs marches représentées par une formule parabolique dont les coefficients ont une inégale importance. Le terme dépendant du temps ne peut pas être calculé d'avance avec une grande certitude, mais si l'on s'en tient à des périodes d'un an au plus, ses coefficients peuvent être généralement déterminés après coup avec assez de précision pour le calcul des longitudes. Les termes dépendant de la température ont, au contraire, des coefficients constants dans les conditions normales d'emploi des chronomètres; ils peuvent être déterminés à l'avance, surtout la constante appelée *température de réglage*; un chronomètre suit la variation de température aussi fidèlement qu'un thermomètre.

Les autres causes de perturbation ne peuvent être évaluées numériquement à l'avance; mais elles ne sont pas capricieuses et il en est peu auxquelles on ne puisse assigner une origine nettement définie. L'effet des mouvements ordinaires du navire est peu important, mais les trépidations et les chocs dus au moteur ont un effet bien net, variable d'une montre à l'autre, constant pour une même montre. L'accélération des chronomètres neufs peut être prévue comme sens, non comme grandeur. L'humidité atmosphérique produit généralement du retard, mais n'a que peu d'action sur un chronomètre bien clos et bien placé. L'épaississement des lubrifiants par l'effet du temps produit des effets d'accélération qui introduisent dans la formule des marches un terme fonction du temps. La résistance des milieux n'a pas d'effet sensible sur la marche, non plus que les frottements ordinaires.

On a tiré de l'étude de ces perturbations des indications très précises sur les conditions dans lesquelles les montres doivent être installées à bord; sur les moyens d'établir la formule des marches, enfin sur le degré de précision que peuvent donner les longitudes.

La conclusion qui ressort surtout nettement de ces études, c'est que l'important dans la construction des chronomètres n'est pas de rendre les erreurs très petites à un moment donné, ce qui ne s'acquiert sou-

vent qu'au prix d'appareils compliqués et sujets à dérangement, mais surtout de rendre ces erreurs régulières, de manière à pouvoir en assigner la valeur à l'avance pour la plus grande partie, et en tout cas d'obtenir qu'une formule calculée avec quelques observations représente le plus fidèlement possible toutes les autres marches. Une montre doit être soignée dans ses moindres détails, même dans ceux qui paraissent secondaires, et par contre on doit éviter trop de finesse dans les organes.

L'Académie des Sciences, à laquelle ces travaux avaient été soumis [1], a décerné à l'auteur le prix de Mécanique de la fondation de Monthyon. Le Rapport de Phillips s'exprimait ainsi :

... « Ce travail est un résumé complet de nos connaissances actuelles sur l'art et la science de la Chronométrie, et il renferme un certain nombre de Mémoires originaux, dans lesquels les faits déduits de la théorie sont soumis au contrôle de l'expérience. S'appuyant sur les méthodes fondées par plusieurs des membres de l'Académie, l'auteur ne s'est pas contenté d'exposer et de développer les conséquences dues à ses devanciers, mais il a établi des résultats nouveaux et intéressants. En résumé, l'œuvre de M. Caspari, faite avec beaucoup de soin et de talent, sera lue avec profit par toutes les personnes qui s'occupent de la construction et de l'emploi des chronomètres. »

(*Comptes rendus*, 28 janvier 1878).

C.

CONGRÈS DE CHRONOMÉTRIE.

Comme secrétaire de la Commission d'organisation du Congrès international de Chronométrie qui a tenu ses séances pendant l'Exposi-

[1] Cet Ouvrage sur le mécanisme et la marche des chronomètres est cité comme source principale du Chapitre « Chronomètres » du *Handbuch der Navigation* (officiel), publié par l'Amirauté allemande.

Il a été tout récemment traduit en langue allemande. En France, il est réglementaire à bord des navires de la flotte et a eu même les honneurs de la contrefaçon.

tion universelle de 1889, et qui était présidée par M. le Vice-Amiral de Jonquières, M. Caspari a pris une part active à la préparation de cette réunion. Nommé ensuite secrétaire du Congrès, que Phillips présidait, il a présenté un Rapport sur les perturbations et le réglage; puis il a été chargé de diriger la publication des Procès-verbaux et du Compte rendu des travaux.

Dans la séance de clôture le Congrès vota un ordre du jour proposé par M. Rozé et ainsi conçu:

... « Nous ne pouvons nous séparer sans adresser nos remerciements à MM. les membres du Bureau, et plus particulièrement à M. Caspari, qui, avec le dévouement le plus méritoire, sans compter son temps ni ses peines, a assumé, comme secrétaire, les soins de la préparation et de l'organisation : nous avons tous pu constater le succès remarquable de l'œuvre accomplie.

» Je propose donc d'adresser par acclamation à MM. les membres du Bureau, à M. Caspari, l'expression de toute notre gratitude. »

II.

RECHERCHES SUR LES COMPAS ET BOUSSOLES.

---

1. Détermination des déviations par des mesures de force horizontale (*Comptes rendus*, t. LXXVI, p. 1197, 1873; *Journal de Physique*, t. II, 1873; *Annales hydrographiques*, t. XXXVI, p. 485(1873).

2. Considérations sur les compas et boussoles (*Recherches chronométriques*, 12[e] Cahier, p. 151; 1878. Imprimerie nationale).

3. Note sur les épreuves à faire subir aux instruments de navigation acquis par le Dépôt de la Marine (*Recherches chronométriques*, t. II, p. 242).

4. Nouveau dygogramme, dit *dygogramme n° 2 modifié* (Note insérée dans le livre de M. le commandant Guyou sur les instruments nautiques).

On sait que l'objet de la régulation des compas est de déterminer la déviation que subissent les boussoles marines sous l'influence du fer employé dans la construction des navires. Les progrès de l'Architecture navale ont eu pour conséquence d'exiger une plus grande précision dans ces déterminations, en même temps que l'emploi plus général du fer dans la construction et les trépidations dues à des moteurs plus puissants accroissaient les causes de perturbation.

Les recherches de l'auteur ont porté d'abord sur la détermination des déviations quand on ne peut pas observer de relèvements astronomiques ou terrestres. Il a proposé l'emploi d'aimants pour observer les variations de la force horizontale; les valeurs trouvées, introduites dans les équations générales, telles qu'elles ont été tirées des formules de Poisson par les auteurs du *Manuel de l'Amirauté anglaise pour les déviations du compas*, permettent de calculer les coefficients variables des déviations et d'en dresser le tableau complet, soit par le calcul, soit par l'emploi d'une construction graphique.

Cette méthode permet, à l'aide d'observations fort simples, de déterminer la valeur approchée de la composante horizontale du magnétisme terrestre en un point quelconque des mers du globe : elle a donc un intérêt à la fois pratique et scientifique. Elle a été expérimentée avec succès sur les bâtiments de la marine nationale et sur ceux de la Compagnie transatlantique : elle a donné lieu, en 1880, à l'addition d'aimants supplémentaires dans les compas réglementaires de la flotte.

La construction graphique, indiquée sous le nom de *dygogramme* dans le *Manuel de l'Amirauté anglaise*, n'était pas applicable aux cas de plus en plus fréquents où le fer n'est pas distribué symétriquement par rapport au plan longitudinal passant par le centre du compas.

L'auteur l'étendit à tous les cas et en fit la base même de la détermination des déviations. C'est en partant de là et en employant cette construction, non seulement pour la détermination des déviations, mais encore pour la démonstration et pour les opérations de compensation au moyen de pièces auxiliaires d'aimants et de fer doux, qu'il

put, sans rien sacrifier de la rigueur des méthodes, réduire la science des déviations à un degré de simplicité qui permettait de l'exposer en un petit nombre de leçons. Elle se trouve ainsi presque complètement débarrassée des développements algébriques qui, si élémentaires qu'ils soient, en général, ont l'inconvénient d'effaroucher beaucoup de marins et de compliquer en apparence les résultats. La solution de tous les problèmes se réduit à construire une ellipse au moyen des données de l'observation; cette ellipse, une fois tracée pour un compas donné, tous les problèmes ultérieurs reviennent à la placer sur une rose des vents, de telle manière que sa position satisfasse aux conditions données par l'observation, ce qui se fait, soit par des constructions de Géométrie élémentaire, soit par des tâtonnements faciles, remplaçant la résolution d'équations compliquées.

Nous n'insistons pas sur les recherches relatives à la mécanique du compas et à ses conditions de stabilité et de sensibilité : un modèle de rose, calculé d'après les données de la théorie, avait pourtant donné de bons résultats, mais l'emploi, de plus en plus général, de l'admirable compas Thomson a fait arrêter ces expériences.

III.

GÉOGRAPHIE, HYDROGRAPHIE, NAVIGATION.

1. Une mission à la Guadeloupe; Notes de Géographie physique (*Revue maritime et coloniale*, 1871).
2. Détermination de positions géographiques en Indo-Chine (*Annales hydrographiques*, 1882).
3. Instructions nautiques sur les côtes de Cochinchine et d'Annam.
4. Des levés sous voiles ou vapeur. Hydrographie expéditive d'une côte. (Formo le Chapitre XIV du *Traité d'Hydrographie* de Germain. Imprimerie nationale, 1882.)

5. Note sur la longitude de Tamatave (*Annales hydrographiques*, 1884).
6. Discussion et Tables de positions géographiques dans les mers des Indes et de la Chine (*Annales hydrographiques*, 1886). Publié aussi à part : 1 vol. in-8° de 132 pages.
7. Rapport sur les sondes d'atterrage de Brest (*Annales hydrographiques*, 1888).
8. Rapport sur la reconnaissance hydrographique du chenal du Four (*Annales hydrographiques*, 1888).
9. Sur la discussion des positions géographiques (*Bulletin de la Société de Géographie*, 1892).

CAMPAGNES HYDROGRAPHIQUES.

1863-1867. Revision des côtes ouest de France (sous la direction de M. Bouquet de la Grye).
1867-1869. Reconnaissance hydrographique de la Guadeloupe et dépendances (avec M. Ed. Ploix).
1872. Reconnaissance des passes d'Arcachon.
1874. Gironde (avec M. Manen).
1875. Seine (avec M. Estignard).
1877-1879. Côtes d'Annam et golfe de Siam.
1883. Revision des côtes nord de France. Levé complet de la Rance et de la Penzé.
1885, Mission à Cheik-Saïd, Obock et dans le golfe de Tadjoura.
1887. Reconnaissance des abords de Brest par le nord, et sondes d'atterrages.

CARTES LEVÉES ET PUBLIÉES.

Côtes de France.

N^os
2088. Embouchure de la Seine.
2228. } Embouchure de la Loire.
2229. }
2334. Pertuis de Maumusson.
2377. Bassin d'Arcachon.
2381. Entrée de la Vilaine.
2622. Goulet de Fromantine.

2724. Baie de Fontarabie.
3165. Le Morbihan.
3639. Port du Passage.
3581. Baie de Saint-Sébastien.
3600. Gironde et partie de la Garonne.
3441. De la Pointe de Grave à Pauillac.
3428. Rades de Royan et du Verdon.
4233. La Rance maritime de Saint-Servan au Chatelier.
4120. Entrée de la rivière de Saint-Pol de Léon ou Penzé.
4373. De la pointe de Corsen à Saint-Mathieu. Chenal du Four.
3911. D'Argenton à la pointe de Corsen.

Guadeloupe et dépendances.

3423. Carte générale de la Guadeloupe.
3125. De la pointe de la Grande-Vigie à la pointe des Châteaux.
2766. Port du Moule.
3045. Mouillage du Galet.
3419. De la Pointe-à-Pitre à la Désirade.
3105. Mouillage de Saint-François.
2658. Mouillage de Sainte-Anne.
3046. Mouillage du Petit-Havre.
2872. Entrée et mouillage de la Pointe-à-Pitre.
3055. Rivière Salée.
3054. Port de Sainte-Marie.
3375. De la Basse-Terre à la Pointe-à-Pitre.
3129. Iles des Saintes.
3418. De la pointe du Vieux-Fort à la pointe Allègre.
3422. De la pointe Ferry à la pointe de la Grande-Vigie.
3367. Grand cul de sac marin (ouest).
3287. Grand cul de sac marin (est).
3124. Mouillage de Port-Louis.
3128. Côte sous le vent de Marie-Galante.
3056. Mouillage du Grand-Bourg.

Indo-Chine.

3852. Iles Poulo-Dama.
3631. Mouillage de la baie Est de Poulo-Condore.
1254. Côte orientale de Cochinchine : du faux cap Varella au cap Choumay.
3866. De la baie de Camraigne au cap Varella.
3854. Baie de Camraigne.

3869. Baies de Niatrang et de Binh-Kang.
3837. Du cap Varella à l'île Buffle.
3841. Ports de Xuanday, Vung-Lam et Vung-Chao.
3901. De l'île Buffle à Poulo-Canton.
3829. Environs de Vung-Moë.
3899. De Hué aux Culao-Cham.
3850. De l'île du Tigre au cap Choumay.
3865. De l'île Hon-Tseu au cap Lay.
3870. Mouillages de Hon-Tseu et de Vung-Cbua.

Golfe d'Aden.

4085. Golfe de Tadjoura.
4106. D'Assab à Obock.

Les travaux hydrographiques se rangent en trois catégories :

A. Levés sur le terrain ; rédaction et publication des Cartes et instructions qui en résultent.

B. Travaux de discussion et de compilation, d'après des documents reçus au service hydrographique.

C. Travaux didactiques.

A.

LEVÉS SUR LE TERRAIN.

Les travaux sur les côtes de France, soit comme chef de mission, soit en sous-ordre, avaient pour objet de compléter et de mettre à jour les Cartes du *Pilote français,* publiées autrefois sous la direction de Beautemps-Beaupré. Ils comprenaient des opérations de triangulation, de topographie et de sondages, avec étude des marées, des courants et du régime des côtes, et généralement de tout ce qui intéresse le marin et l'ingénieur.

Guadeloupe.

La reconnaissance détaillée de la Guadeloupe et de ses dépendances n'avait pas encore été faite. Le travail de MM. Ploix et Caspari comprend : une triangulation, appuyée sur la mesure d'une base; le levé topographique complet, tant de la côte que de l'intérieur des îles; les

sondages et l'étude des nombreux bancs qui bordent les côtes et s'étendent parfois très loin au large; les déterminations astronomiques ayant pour objet d'orienter la triangulation et de fixer la position géographique du groupe. Ces opérations ont été faites par les méthodes exactes employées sur la côte de France, mais dans des circonstances souvent difficiles de climat et de localités.

Les Notes de Géographie physique publiées dans la *Revue maritime* résument les observations faites en dehors du travail principal, et qui ne pouvaient entrer dans les Instructions nautiques; elles contiennent certains détails relatifs à la Géologie, notamment en ce qui concerne la Grande-Terre, Marie-Galante et les bancs sous-marins; des études sur la croissance des madrépores, sur les mouvements lents du terrain, qui semblent déceler un affaissement par places, un exhaussement ailleurs; des observations sur le régime des rivières et torrents, sur la météorologie spéciale des îles, sur les phénomènes des raz de marées, des lames de fond et des tremblements de terre; sur les attractions magnétiques locales; sur certains effets des ouragans, etc.

Cochinchine, Annam et Tonkin.

Le levé hydrographique des côtes d'Annam, entre le cap Padaran et le Tonkin, et des côtes de Cochinchine sur le golfe de Siam, présente un caractère fort différent. Les circonstances locales et le manque de temps, de ressources et de personnel ne permettaient pas ici de procéder par le menu, comme on le fait en pays civilisé. Il s'agissait de donner immédiatement des Cartes suffisamment exactes pour permettre de parcourir l'étendue de 600 milles de côtes qui se développe du cap Padaran à l'île Hon-Tseu, entre les 11° 35′ et 18° 6′ de latitude nord, vaste région, d'aspect très varié, dans laquelle les environs de Tourane et ceux de Quinhone avaient seuls fait l'objet d'un levé régulier. Il fallut donc recourir à des méthodes de travail rapides, sans sacrifier l'exactitude pratique; choisir les points importants, s'attacher à tout ce qui intéresse la navigation, et surtout établir un réseau de positions assez bien déterminées pour que les travaux ultérieurs et les études de détail vinssent s'encadrer sans difficulté dans les Cartes publiées.

Notre hydrographie offre plusieurs modèles de ces levés rapides;

ils ont été codifiés par M. de Tessan, qui avait exploré de cette manière les côtes d'Algérie. L'esprit de la méthode consiste à combiner les stations à terre et les stations à la mer, en déterminant astronomiquement les bases du travail, et à rédiger graphiquement la triangulation ainsi faite. Il nous a semblé que ce procédé comportait certains perfectionnements, lesquels, sans lui ôter rien de sa rapidité, permettaient d'atteindre une exactitude supérieure.

Quand on défile rapidement devant une côte que l'on n'aura peut-être pas l'occasion de revoir, il est indispensable de se ménager le plus grand nombre possible de vérifications. Ces vérifications sont ici de deux sortes : d'abord nous avons multiplié les observations astronomiques beaucoup plus qu'il ne le fallait strictement pour assurer les bases de la triangulation; ensuite nous avons perfectionné la méthode de mesure des bases par des observations de hauteur de la mâture, prenant de grandes précautions pour éviter les erreurs systématiques de ce genre d'observations, notamment par l'emploi des relèvements réciproques de trois observateurs, dont l'un est à bord. Les hauteurs de mâture, au lieu d'être mesurées directement, ont été déduites d'une première base mesurée à terre : la valeur qui en est résultée était bien celle qui convenait au mode d'observation employé; c'était en quelque sorte notre première base transportée de mouillage en mouillage. Il a été possible ainsi de lever très exactement les mouillages successifs, déterminés chacun astronomiquement; il ne s'agissait que de relier ces mouillages entre eux, ce qui fut l'objet d'une triangulation s'appuyant sur les signaux naturels, dans laquelle les azimuts astronomiques déterminés directement jouaient le principal rôle. Il eût été presque suffisant d'opérer ce rattachement par les méthodes graphiques; mais ces méthodes ont l'inconvénient de laisser les erreurs s'accumuler et de se prêter trop complaisamment aux *vérifications* involontaires. Il parut préférable de calculer tout le réseau, en appliquant de suite les formules directes des triangles sphériques; on put ainsi avoir une règle bien fixe et exempte de tout arbitraire pour compenser les unes par les autres les différentes bases astronomiques mesurées, et atteindre pour la détermination des positions toute la précision que comportaient les observations et que le graphique ordinaire n'eût pas pu conserver.

Les meilleurs signaux naturels dans ces sortes de travaux sont les sommets des montagnes, qui sont généralement inaccessibles; on manque donc d'ordinaire des vérifications que peut donner la fermeture des triangles. Mais, grâce aux petites triangulations locales dont nous avons parlé, certains artifices permettent alors d'opérer des réductions au centre de signaux éloignés, et les mesures d'azimuts réciproques remplacent la vérification de la fermeture, de sorte qu'il est possible d'établir un véritable réseau de triangles dont la forme est bien définie et qui doivent donner la valeur des différentes bases astronomiques en fonction les unes des autres; on aperçoit aisément comment ensuite on peut compenser ces bases les unes par les autres. Des levés sous vapeur servent enfin à relier entre eux les points explorés en détail.

Les observations astronomiques sont la partie essentielle d'un pareil travail. C'est là surtout qu'il s'agit d'obtenir le maximum de précision dans le minimum de temps.

Il ne pouvait être question, dans les circonstances d'une campagne de ce genre, de recourir à l'emploi de la lunette méridienne; les observations de nuit étaient rarement possibles et se conciliaient mal avec les travaux nécessaires de la journée. En prévision de ce cas, l'auteur avait fait construire par MM. Brunner un théodolite spécial, véritable instrument universel d'une précision très satisfaisante. L'emploi de microscopes pour les lectures des deux cercles, l'adjonction de niveaux très soignés donnaient aux lectures la même précision qu'aux pointés, et les observations de nuit étaient aussi faciles que celles de jour, conditions que les théodolites à deux limbes ne remplissent pas toujours.

L'usage exclusif de cet instrument a permis d'arriver à plusieurs conclusions intéressantes. Et, d'abord, nous avons pu prouver qu'avec quatre ou cinq chronomètres il est possible d'atteindre, dans les observations des différences de longitude entre lieux voisins, une précision tout à fait de même ordre que celle que donnent les observations de latitude. Nous avons pu montrer notamment que, lorsque le Soleil culmine à de petites distances (9° à 10°) du zénith, l'observation de l'heure par les circomméridiennes, telle qu'elle a été recommandée par M. de Littrow et introduite en France par M. Faye, donne des dif-

férences de longitude avec la même précision que les observations dans les circonstances dites *favorables*. Nous avons aussi mis en lumière que les *différences* de latitude, observées au soleil, avec la précaution de suivre cet astre sur le terrain de manière à avoir tous les jours à peu près la même distance zénithale, sont plus exactes que les latitudes absolues, et que les bases ainsi obtenues sont très bonnes.

Le levé des côtes de Cochinchine sur le golfe de Siam a été effectué d'après les mêmes méthodes et a conduit aux mêmes résultats.

Au point de vue purement géographique, nous mentionnerons le rattachement de Poulo-Condore et Bangkok au réseau de positions de la Cochinchine et de l'Annam; l'ensemble des positions ainsi déterminées a pu servir de canevas à la Carte générale de l'Indo-Chine de M. Dutreuil de Rhins. La détermination des sommets de la grande arête montueuse qui, partant du cap Padaran, va jusqu'au Tonkin et sépare le bassin du Mékong de celui des petites rivières qui arrosent les côtes orientales, a rectifié et précisé les tracés vagues et erronés que portaient les Cartes publiées avant 1880. C'est encore sur ces positions, combinées avec celles de la Cochinchine, et les déterminations de Doudart de la Grée le long du Mékong, que s'appuient les Cartes les plus récentes, notamment la belle Carte de la mission Pavie.

Quelques observations sur la Géologie, encore inédites, mais qui ont été communiquées à M. Ed. Fuchs et utilisées par lui dans ses publications, sont les seules notions qu'on ait eues pendant longtemps sur la région annamite, entre la Cochinchine et le Tonkin.

Elles ont montré la prédominance des terrains de cristallisation et des schistes anciens sur toute la côte orientale d'Annam.

Les Cartes qui ont été publiées sont accompagnées d'une description de la côte et d'instructions nautiques. Un opuscule spécial donne les détails de la détermination des positions géographiques fondamentales et une Table de positions de l'Indo-Chine.

Le levé de la côte nord du golfe de Tadjoura et des abords d'Obock a été fait uniquement sous vapeur; une reconnaissance régulière, due à M. de Carfort, en a récemment vérifié l'exactitude.

B.

TRAVAUX DE DISCUSSION.

Les Cartes générales de l'océan Indien, publiées par Daussy, n'étaient plus au niveau des connaissances actuelles. Chargé, au Dépôt de la Marine, de la section des mers des Indes et de la Chine, l'auteur dut procéder à une refonte de ces Cartes. Il était nécessaire, pour cela, d'établir tout d'abord un ensemble homogène de positions géographiques, en s'aidant de tous les travaux originaux publiés et des nombreuses observations inédites que renferment les archives du Service hydrographique. La méthode employée est celle de Daussy, qui consiste à discuter séparément les différences de méridiens et à établir ainsi de proche en proche un réseau complet et homogène. Le télégraphe électrique a donné les longitudes de tous les points de l'ancien et du nouveau continent rapportés aux méridiens de l'Europe. Mais la chaîne n'est pas fermée, aucune détermination télégraphique n'ayant été faite entre les deux rives de l'océan Pacifique. Une discussion préliminaire des observations de culminations lunaires, faites en Asie et en Amérique par M. Fleuriais, montra qu'en employant les différences de longitude de cet observateur au lieu des longitudes absolues, la fermeture du réseau était assurée dans les limites d'exactitude que la Géographie peut désirer. Le point de départ ainsi assuré, il ne restait qu'à fixer un certain nombre de méridiens fondamentaux auxquels on rapporta toutes les différences adoptées après discussion. Ce travail a amené à fixer 160 points avec toute la rigueur nécessaire pour que les erreurs qui les affectent encore ne soient pas sensibles sur les Cartes routières. Ce travail a été utilisé pour compléter et rectifier la Table des positions de la *Connaissance des Temps;* l'amiral Cloué le cita parmi les sources principales de ce Recueil; les positions déterminées embrassent la vaste étendue de côtes qui va de Suez et du cap de Bonne-Espérance jusqu'au Japon et au grand Archipel d'Asie; elles ont servi à la refonte des Cartes de ces parages.

Les principes d'après lesquels ce genre de discussion doit être fait ont été résumés dans un Mémoire communiqué à la *Société de Géographie* et publié dans son *Bulletin*.

C.

TRAVAUX DIDACTIQUES.

L'auteur a exposé dans le Chapitre XIV du *Traité d'Hydrographie* de M. Germain la méthode des levés hydrographiques rapides telle qu'elle résultait de son expérience et des travaux antérieurs.

Il a complété ces notions en les étendant aux levés dans l'intérieur des terres : c'est l'objet du XI[e] Chapitre du *Cours d'Astronomie pratique* dont il sera question ci-après.

IV.

ASTRONOMIE.

---

1. Détermination de la longitude du méridien fondamental de la Guadeloupe, par des observations de culminations lunaires (*Additions à la Connaissance des Temps* pour 1875).
2. Rapport fait au nom de la Commission d'unification des longitudes et des heures (Imprimerie nationale, août 1884).
3. Note sur la même question et sur le signe à attribuer à la longitude (*Comptes rendus*, t. XCIX, p. 368; 1884).
4. L'unification des longitudes et des heures (*Revue générale des Sciences*, 15 juin 1890).
5. Sur le point par deux hauteurs du problème de Douwes (*Annales hydrographiques*, p. 267; 1888).
6. Cours d'Astronomie pratique. Application à la Géographie et à la Navigation (2 volumes in-8°; Gauthier-Villars, 1888-1889).

   Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences.

Observations astronomiques.

Le méridien fondamental de la Pointe-à-Pitre (Guadeloupe) a été déterminé en 1867-1868 par l'observation des culminations lunaires : ce travail a reçu l'approbation du Bureau des Longitudes, d'après les instructions duquel il avait été exécuté. En même temps, l'auteur faisait des observations de hauteurs égales de la Lune et d'une étoile voisine, et vérifiait les bons résultats qu'on peut attendre de cette méthode, alors très peu pratiquée.

Les observations de latitude faites à la Pointe-à-Pitre et au Camp Jacob, et comparées aux résultats de la triangulation, ont mis en évidence une déviation de la verticale montant à 15″ et produite par l'attraction du massif de la Soufrière.

Le levé hydrographique des côtes de l'Annam et du Tonkin a été appuyé sur de nombreuses déterminations astronomiques directes de longitude et de latitude (*voir* ci-dessus).

Unification des longitudes et des heures.

Cette question est assez actuelle pour qu'il soit superflu d'en développer l'objet. Lorsqu'en 1884 toutes les nations civilisées furent invitées à se faire représenter à la conférence qui devait traiter cet objet à Washington, le Ministre de l'Instruction publique forma une Commission chargée d'étudier et de formuler les propositions à y apporter au nom de la France, et qui se réunit sous la présidence de M. Faye. L'auteur, choisi pour représenter le Département de la Marine au sein de cette Commission, s'efforça de faire ressortir le peu d'avantages et les nombreux inconvénients qu'entraînerait, pour la Marine et la Géographie françaises, le changement du premier méridien, et de montrer le caractère chimérique de l'institution d'une heure universelle. Il eut l'honneur d'être choisi, par la Commission, comme secrétaire d'abord, comme rapporteur ensuite.

Le Rapport rédigé à cette occasion reçut l'approbation de plusieurs membres de l'Académie; M. Janssen, qui en soutint les conclusions à Washington avec tant d'énergie et de talent, en a fait une mention

très flatteuse dans le Rapport qu'il présenta à l'Académie au retour de la mission dont il avait été chargé par le gouvernement français (voir *Comptes rendus*, t. C, p. 706; 1885).

Depuis lors, l'auteur est revenu à plusieurs reprises sur la question, dans la presse, et au sein des Sociétés de Géographie et d'Astronomie, et s'est efforcé de montrer que l'intérêt scientifique est absolument d'accord ici avec l'intérêt national.

Cours d'Astronomie pratique.

Dans ce Livre, reproduction des leçons professées au Dépôt de la Marine, l'auteur s'est proposé, non seulement de donner des méthodes d'observation et de calcul fixes et plus ou moins classiques, mais de mettre le lecteur à même de choisir et de modifier au besoin les méthodes, en ayant égard aux circonstances si variées qui peuvent se présenter en cours de voyage. Il pose en principe que l'Astronomie du voyageur est, en quelque sorte, le contre-pied de l'Astronomie d'observatoire, tant par son objet que par les moyens qu'elle emploie. Après les travaux remarquables de l'école de Bessel, il n'y avait pas à songer à se priver des ressources que l'Analyse mathématique offre à l'Astronomie sphérique. Mais, d'un autre côté, les formules qu'on déduit des méthodes analytiques n'ont pas toujours la clarté et l'évidence nécessaires : il est très utile de les contrôler et de les appuyer par des considérations géométriques aussi intuitives que possible.

A ce point de vue, entre autres, la considération des lieux géométriques, si féconde dans les méthodes de la nouvelle navigation, n'a pas moins d'importance pour la discussion des solutions, de leur degré de précision, des circonstances dans lesquelles tel procédé peut donner de bons résultats : aussi a-t-elle été mise largement à contribution. Le voyageur n'a d'ordinaire à sa disposition que des instruments plus ou moins imparfaits; mais un choix judicieux des méthodes permet souvent d'augmenter beaucoup la précision du résultat. La perfection atteinte actuellement dans la construction et l'emploi des chronomètres de marine permet d'assigner à leurs indications une précision égale, sinon supérieure, à celle que donnent les autres instruments en usage à bord, et de traiter par conséquent tous les pro-

blèmes d'Astronomie nautique par la méthode des lieux géométriques. Les chronomètres employés dans les voyages d'exploration continentale sont moins parfaits, mais peuvent donner avec une grande précision de petits intervalles et se substituer avec avantage aux cercles divisés pour certaines mesures angulaires. Les instruments de mesure angulaire eux-mêmes peuvent donner des indications plus précises que celles qu'on leur demande d'ordinaire, à condition de diriger les méthodes d'observation vers l'élimination des erreurs systématiques et d'utiliser toujours la partie la plus sensible de l'instrument.

L'auteur insiste tout particulièrement sur les erreurs systématiques nombreuses et importantes qui peuvent vicier les mesures : erreurs instrumentales, telles que l'imperfection de la graduation, l'inertie des niveaux à liquide; erreurs d'ordre physique, comme les anomalies de la réfraction; il s'attache à montrer pratiquement comment il faut diriger l'observation pour s'en affranchir autant que possible, substituer aux observations absolues des observations différentielles. Il y a tout bénéfice à emprunter à l'Astronomie d'observatoire les méthodes de détermination minutieuse des corrections de chaque instrument. Il faut lui emprunter aussi, toutes les fois qu'on le peut, les méthodes rapides de calcul consistant, au lieu de calculer une quantité, à chercher la correction que doit recevoir une valeur approchée de cette quantité, prise comme départ. Moins on emploie de chiffres dans les calculs et moins on court de chances d'erreur : c'est un principe évident et qui pourtant est fréquemment oublié. Toute la Trigonométrie sphérique se résume en un petit nombre de formules faciles à retenir et à calculer : il faut éviter d'introduire sans nécessité des transformations nouvelles et, par exemple, substituer le plus possible l'usage des logarithmes d'addition à l'emploi de formules quelquefois élégantes, mais souvent compliquées. Très souvent une simple construction graphique peut remplacer de longs calculs : les cas de ce genre sont mis en lumière toutes les fois que l'occasion s'en présente.

Le point fondamental, pour un observateur, c'est de se rendre compte à lui-même de la précision de ses mesures et de celle des résultats qu'il en déduit.

C'est pour cela que la conclusion du Livre est un essai de théorie des erreurs, envisagée au point de vue spécial de l'Astronomie du voyageur :

on y relève les nombreuses causes d'erreurs, et l'on met en garde contre la tendance à se faire illusion à soi-même par l'emploi des méthodes en quelque sorte mécaniques auxquelles conduit la théorie des moindres carrés, tout en indiquant les conditions où cette méthode peut être appliquée avec avantage : mais, dans la plupart des cas, la méthode de Cauchy et surtout celle de Mayer devront être préférées. Le principal usage de la théorie des erreurs doit être de guider l'observateur et de lui faciliter la détermination des *circonstances favorables*.

Tels sont les principes dont l'auteur s'est inspiré. En ce qui concerne les détails, comme il le fait observer dans sa Préface, il semble difficile d'innover beaucoup dans un domaine aussi exploré que celui-là ; néanmoins, il croit avoir donné plusieurs solutions nouvelles, soit pour le problème en lui-même, soit pour la forme sous laquelle il a été traité. Il pense pouvoir, à ce point de vue, attirer l'attention sur les paragraphes suivants du Livre :

§ 69-73. *Pratique des observations.* — On y insiste plus que cela ne se fait d'ordinaire sur le but réel de chaque observation, sur la manière de la conduire, et sur les combinaisons qui permettent d'éliminer les erreurs systématiques, en distinguant les qualités et défauts particuliers à chaque espèce d'instruments.

§ 101. *Colatitude par la digression des circompolaires.* — Chapitre qu'on ne trouve dans aucun des traités classiques : nouvelle formule de réduction de ces observations.

§ 104. *Colatitude par le temps que met le Soleil à passer dans un vertical donné.* — Méthode pour obtenir une colatitude approchée et qui peut donner des résultats suffisamment bons sous les basses latitudes, en se servant d'instruments très imparfaits. Peut être recommandée comme vérification dans un voyage rapide par terre, lorsqu'on n'a pas pu observer le Soleil à midi.

§ 107. *Heure par les hauteurs égales de deux astres.* — C'est une extension de la méthode des hauteurs correspondantes, pour le cas où les circonstances ne permettent pas d'avoir recours à cette dernière. Elle en a tous les avantages de précision; c'est une solution, plus facile dans un cas particulier, du problème général résolu par Gauss et consistant à trouver à la fois la latitude et l'heure par l'observation de trois astres à la même hauteur.

§ 109. *Heure par les distances zénithales doubles.* — Méthode de calcul très simple de l'heure quand on a observé la somme de deux distances zénithales

au théodolite et quand on ne peut pas admettre que la moyenne des heures correspond exactement à la demi-somme des distances observées.

§ 110. *Méthode de Littrow pour l'heure par les circomméridiennes.* — C'est la méthode préconisée par M. Faye, à laquelle on a joint les corrections résultant de la variation de la déclinaison, du déplacement de l'observateur et de l'observation des distances zénithales doubles au théodolite.

§ 111. *Heure par les circomméridiennes. Méthode indirecte.* — C'est la précédente dont le calcul est simplifié en partant des valeurs approchées de la colatitude et de la correction du chronomètre, et calculant les corrections de ces valeurs par des équations de condition dont la méthode de Mayer donne une solution particulièrement rapide et exacte.

§ 117. *Formules approchées pour l'azimut à de petites hauteurs.* — Termes de correction d'un calcul plus rapide que les formules exactes et applicables à un cas particulièrement intéressant des observations d'azimut, parce que c'est celui qui se rencontre le plus fréquemment dans la pratique.

§ 127-133. *Longitude par les chronomètres.* — Étude complète des méthodes en usage et indication d'une méthode nouvelle pour le cas où l'on a une chaîne fermée d'observations.

§ 136. *Distances lunaires.* — Correction de la formule de Borda pour avoir égard à l'aplatissement de la Terre. On insiste sur la nécessité de tenir compte de cette correction et sur l'importance des erreurs que l'on commet en la négligeant.

§ 170 et 175. *Colatitude et heure par plusieurs distances zénithales.* — Application des équations de condition à la réduction d'un certain nombre de distances zénithales, égales ou inégales, d'un ou de plusieurs astres, dont la méthode citée plus haut de l'observation de trois hauteurs égales est un cas particulier. Application de la méthode des moindres carrés.

On nous permettra encore de citer parmi les parties originales, sinon par l'invention, du moins par le groupement et la méthode d'exposition :

§ 29 et 158. Courbes de hauteur.

§ 52 à 56. Corrections du théodolite.

§ 137. Longitude par les hauteurs de la Lune (Méthode expérimentée par l'auteur en 1868).

§ 164. Mesure des bases astronomiques et calcul des triangles.

§ 166. Indications pratiques sur la méthode de levé des Cartes.

§ 169. Examen général des circonstances favorables aux observations avec applications numériques.

§ 99. Colatitude par le passage au premier vertical, avec indication de la manière d'appliquer cette méthode avec des instruments portatifs très imparfaits.

§ 155. Solution nouvelle du problème de Douwes ou du point par deux hauteurs et l'intervalle.

§ 140. Méthode pour la prédiction des occultations des étoiles par la Lune.

Ce Livre a été couronné par l'Académie des Sciences dans la séance du 30 décembre 1889. Le rapporteur, M. Bouquet de la Grye, s'exprimait ainsi :

« Cet Ouvrage se recommande par la clarté des exposés, par l'absence de toute discussion surabondante, et par les vues nouvelles qui en font une œuvre originale, ne pouvant être considérée comme simplement didactique. »

V.

MÉTÉOROLOGIE NAUTIQUE.

---

1. Météorologie nautique : Vents et courants. Les mouvements de la Terre et de l'atmosphère. Routes de navigation (en collaboration avec M. Ch. Ploix). 1 vol. in-4° de 232 pages. Imprimerie nationale, 1874. Publication du Dépôt de la Marine.
2. Rapport sur le ballon *le Jacquart* (*Revue maritime et coloniale*, 1872).
3. Rapport sur un cyclone essuyé par l'*Atalante* (*Annales hydrographiques*, 1873).
4. Description du météorographe du Dépôt de la Marine (*Recherches chronométriques*, t. II, p. 47).

5. La Météorologie nautique au XVII[e] siècle (*Revue maritime et coloniale*, 1875).

6. Rapports au Congrès de Géographie sur diverses questions de Météorologie nautique (*Procès-verbaux du Congrès de Géographie de* 1889).

Il n'y a pas à rappeler ici les travaux du lieutenant Maury, le fondateur de la Météorologie nautique, non plus qu'à insister sur l'importance des résultats obtenus par le célèbre hydrographe américain. Mais à mesure que les résultats des observations s'accumulaient, on reconnut la nécessité de corriger les théories trop absolues et trop simplistes par lesquelles il avait représenté les phénomènes, et de tenir un compte plus exact des détails et des faits d'expérience qui étaient contenus dans les nombreuses Cartes publiées. C'est dans cet ordre d'idées que fut conçu l'Ouvrage cité plus haut : *Météorologie nautique : Vents et courants*, etc. C'est le premier essai (1874) d'un tableau général et fidèle des circulations océanique et atmosphérique telles qu'elles se produisent réellement, en tenant compte de tous les résultats récents de l'observation et en évitant de plier les faits aux exigences d'une théorie absolue. On y trouve des Cartes qui donnent pour la première fois le tableau des courants océaniques pour les deux saisons extrêmes, marquant ainsi les modifications que la circulation des eaux subit du fait de leur alternance. On y met en évidence la variété infinie des causes qui produisent ces courants, en essayant d'attribuer rationnellement à chacune les effets qui lui reviennent. De même, pour la théorie des vents, les Cartes des vents pour les saisons extrêmes ne sont pas simplement schématiques : elles ont été dressées en déterminant, d'après la formule de Lambert, pour chaque rectangle de 5° de côté, la résultante des vents observés, et les flèches indiquent cette résultante en grandeur relative et en direction : la circulation, en vertu de laquelle les vents font le tour d'un bassin océanique, est bien établie par les observations ; on montre les variations du régime avec les saisons : on réduit à leur juste signification les prétendues bandes de calmes qui feraient le tour de la Terre; on rapproche sur les mêmes feuilles les trajectoires des grands courants

aériens, les isobares et les isothermes, ce qui établit à vue les relations qui les lient. On développe ensuite le caractère des perturbations atmosphériques en mettant en évidence leur caractère cyclonique qui autrefois était attribué aux seuls ouragans des tropiques; on fait la géographie de ces mouvements tournants en délimitant avec netteté les régions qui en sont exemptes et celles où ils sévissent le plus fréquemment.

Enfin on a appliqué ces résultats à la détermination des principales routes maritimes. Les faits groupés dans ce Livre sont encore aujourd'hui généralement acceptés et n'ont pas été sensiblement modifiés par les découvertes faites dans les dix-huit dernières années, et l'Ouvrage, réglementaire à bord des bâtiments de la flotte, sert toujours de guide aux officiers de marine pour l'utilisation des Cartes des vents et courants les plus récentes.

Comme application des théories météorologiques, citons le Rapport sur le ballon le *Jacquart*, parti pendant le siège de Paris et dont on n'avait pas eu de nouvelles. Le Ministère de la Marine avait donné l'ordre de rechercher les circonstances probables du trajet de cet aérostat. L'étude complète de toutes les données météorologiques de la période correspondante amena l'auteur à déterminer un trajet très différent de celui qu'on aurait pu induire des vents observés au départ; et, en concluant de l'ensemble des observations météorologiques la direction probable des vents dans les régions supérieures de l'atmosphère, à admettre, avec une grande probabilité, que le ballon « avait été entraîné hors de France, dans une direction estimée au N.-O. de Paris, dans laquelle il ne pouvait trouver que l'Angleterre, la partie sud de l'Irlande, et, au delà, l'Océan jusqu'au Groënland. »

Postérieurement à la publication de ce Rapport, les journaux ont en effet relaté la découverte, au Groënland, d'un sac de dépêches et d'un squelette d'homme, qui ne pouvaient correspondre qu'au *Jacquart*.

Nous rappellerons enfin que le *météorographe* du Dépôt de la Marine, dont l'auteur eut, en 1864, à étudier et suivre la construction, faite par M. Salleron, et le fonctionnement au Dépôt de la Marine, est

le premier essai d'appareil enregistrant automatiquement tous les éléments essentiels de la Météorologie : baromètre, thermomètre, pluie, force et direction du vent. Expérimenté pendant deux ans, dans des conditions d'ailleurs défavorables, il a donné des résultats qui prouvaient pourtant la possibilité de recueillir des données exactes avec un appareil de ce genre.

VI.

TRAVAUX DIVERS.

1. Formules sur les rayons de courbure; sur une propriété de l'ellipse (*Nouvelles Annales de Mathématiques*, 1863).
2. Mémoire sur le bassin d'Arcachon (Imprimerie nationale, 1873).
3. Recherches hydrographiques sur le régime des côtes. Cahiers XII, XIII, XIV (ce dernier en cours de publication). Publication du Service hydrographique (Imprimerie nationale).
4. Phares électriques. Rapport de la Commission nautique spéciale, publié par le Ministère des Travaux publics (Imprimerie Cabasson, 1886).

Les Commissions nautiques du littoral sont chargées de l'étude de tous les avant-projets des travaux à exécuter dans les ports et sur les côtes. Elles donnent leur avis sur les conséquences que peuvent avoir ces travaux au point de vue des facilités à donner à la navigation et à celui des modifications que leur exécution peut provoquer dans le régime du littoral et des fonds sous-marins. L'auteur a été, de 1879 à 1886, rapporteur de cinquante Commissions nautiques, dans lesquelles il a réussi fréquemment à faire adopter des solutions plus

économiques ou plus avantageuses au point de vue de l'avenir. Il s'est attaché tout particulièrement à faire prévaloir les tracés qui utilisent le mieux les forces naturelles en jeu, et à réagir contre l'abus des constructions trop coûteuses, telles que les quais verticaux en pierres de taille, qui, à l'inconvénient d'une exécution souvent longue, joignent fréquemment celui d'augmenter, au lieu de la réduire, l'agitation des eaux dans les ports.

Nous citons, pour mémoire, des travaux de topographie militaire pendant le siège de Paris; à la même époque, l'auteur, chargé du service des instruments, imagina plusieurs types d'instruments qui furent délivrés aux marins de la défense.

Comme répétiteur du cours de Mécanique à l'École Polytechnique, il a eu l'occasion de proposer certaines simplifications dont une partie ont été adoptées dans l'enseignement par M. Resal, professeur.

18930 Paris. — Imprimerie Gauthier-Villars et fils, quai des Grands-Augustins, 55.